

文章编号: 1674—8247(2023)03—0032—05

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2023. 03. 007

基于风—车—桥耦合振动的导风屏障防风效果研究

吕娜¹ 张英虹¹ 谢海清² 张鹤¹ 金怡新¹

(1. 成都亚佳工程新技术开发有限公司, 成都 610083;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要: 本文以大宁河特大桥为工程背景, 通过风洞试验和风—车—桥耦合分析, 对比了未设置导风屏障、设置 2.5 m、3 m 高导风屏障 3 种工况下的列车三分力系数、风速折减系数, 研究了横风对 350 km/h 速度列车、桥梁的动力响应的影响, 结果表明: (1) 桥面设置导风屏障后, 列车的侧力系数和倾覆力矩系数大幅衰减, 桥梁的侧力系数明显增大; (2) 该桥不设置防风措施, 风速达到 15 m/s 时, 列车就须限速通行; 设置高度 3 m 的导风屏障后, 风速达到 30 m/s, 列车仍可按设计 350 km/h 速度安全通过; (3) 导风屏障的设置并未增加桥梁的动力响应, 反而因其合理的挡、导风结构减小了大风对桥梁的影响。

关键词: 高速铁路; 导风屏障; 风屏障; 导风; 风—车—桥耦合; 气动效应; 安全阈值

中图分类号: TU352.2; U448.13

文献标识码: A

A Study on the Windproof Effect of Wind Deflector Based on Wind-vehicle-bridge Coupled Vibration

LV Na¹ ZHANG Yinghong¹ XIE Haiqing² ZHANG He¹ JIN Yixin¹

(1. Chengdu Alga Engineering New Technology Development Co., Ltd., Chengdu 610083, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Taking Daning River Super Major Bridge as the engineering background, through wind tunnel test and wind-vehicle-bridge coupling analysis, this paper compares the three-component force coefficient and wind speed reduction coefficient of trains under three working conditions of no wind deflector and 2.5 m and 3 m high wind deflectors, and analyzes the influence of crosswind on the dynamic response of trains and bridges at 350 km/h speed. The results show that: (1) After the bridge deck is provided with a wind deflector, the lateral force coefficient and overturning moment coefficient of the train are greatly attenuated, and the lateral force coefficient of the bridge is obviously increased. (2) Without wind protection measures provided on the bridge, when the wind speed reaches 15 m/s, the train must pass at a limited speed; After installing a 3 m high wind deflector, the train can still safely pass at the designed speed of 350 km/h even when the wind speed reaches 30 m/s. (3) The installation of wind deflectors did not increase the dynamic response of the bridge, but rather reduced the impact of strong winds on the bridge due to its reasonable wind shielding and guiding structure.

Key words: high-speed railway; wind deflector; wind barrier; wind guidance; wind-vehicle-bridge coupling; aerodynamic effect; safety threshold

收稿日期: 2022-05-18

作者简介: 吕娜(1982-), 女, 工程师。

引文格式: 吕娜, 张英虹, 谢海清, 等. 基于风—车—桥耦合振动的导风屏障防风效果研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(3): 32–36.

LV Na, ZHANG Yinghong, XIE Haiqing, et al. A Study on the Windproof Effect of Wind Deflector Based on Wind-vehicle-bridge Coupled Vibration [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(3): 32–36.

随着我国铁路建设的发展,强风对高速列车通过桥梁的安全运行的影响成为不可避免的问题。目前,国内外强风下行车管制规程中都对桥面最大瞬时风速做了规定,在易发生强风或突发性大风的高架线和桥梁上,设置风向风速仪来监视瞬时风速和风向,其信号被传送至邻近车站和中央调度所,以控制列车运行速度^[1-3]。

为减少列车因强风而限速的频度和提高限速值,更积极有效的方法是根据桥梁条件,设置适宜的风屏障^[4-5]。对于设置风屏障的桥梁,可根据风洞试验以及风-车-桥系统耦合振动研究来确定强风时列车运行风速的限值,如兰新铁路第二双线在30 m/s大风条件下,设置风屏障后,列车在桥上的运行速度可达250 km/h,打破了TG 101-2014《铁路技术管理规程(高速铁路部分)》中无风屏障时“桥面风速达到30 m/s时,列车在桥梁上就禁止运行”的规定。

本文以大宁河特大桥为工程背景,把风、列车、桥梁、导风屏障作为整体系统进行研究,对未设置风屏障、设置2.5 m、3 m高导风屏障3种工况下,列车、桥梁的气动效应进行风洞试验,计算2种不同高度导风屏障对桥上列车、以及桥梁的动力响应,从而确定30 m/s风速时,列车安全通过桥梁的最佳导风屏障高度及最大时速。研究成果可为风区桥梁制定防风措施提供一定的参考。

1 工程概况

大宁河特大桥为双线中承式钢管混凝土劲性骨架拱桥,拱跨度为282 m,矢高为70.5 m,桥梁总长370.2 m,设计速度350 km/h;依据“全国桥梁抗风风险区划图及风速参数分布图表”^[6]中重现期100年的风速值,考虑桥梁高度、地形等修正系数,推算出桥面位置设计基准风速为30 m/s。

导风屏障结构设置了2种高度,分别为2.5 m和3 m,透风率约35%。

2 风洞试验

2.1 风洞试验内容

为明确导风屏障对列车气动特性的影响,针对桥梁上不安装导风屏障、安装2.5 m、3 m高导风屏障3种工况进行风洞试验。

试验中导风屏障整体透风率约30%,导风叶片安装间距0.5 m。

风洞试验主要测试各工况下列车三分力系数及桥梁内外风速的变化。

2.2 风洞试验模型及简化

风洞试验采用车桥节段模型,车辆、桥梁、导风屏障结构模型采用1:15大缩尺比例加工,导风屏障结构模型长2 m,宽0.973 m,高0.23 m。

模型略去了对桥梁气动力影响较小的附属设施,仅保留主梁和轨道道床。考虑到影响导风屏障挡风性能以及导风叶片的加工成本,对导风叶片结构进行简化处理,去除折弯角等;导风叶片厚度设置为5 mm,确保试验时导风叶片具有良好的稳定性能。

列车受到的三分力按式(1)~式(3)计算。

侧力系数:

$$C_D = 2F_x / (\rho U^2) / S \quad (1)$$

升力系数:

$$C_L = 2F_z / (\rho U^2) / (BL) \quad (2)$$

倾覆力矩系数:

$$C_{MX} = 2M_x / (\rho U^2) / (B^2 L) \quad (3)$$

式中: F_x ——体轴坐标系下列车受到的纵向阻力;

F_z ——竖向升力;

M_x ——倾覆力矩;

S ——列车横截面积;

B ——列车宽度;

L ——车厢长度;

ρ ——空气密度;

U ——横向风速。

2.3 风洞试验结果及分析

2.3.1 列车三分力系数

未设置导风屏障、设置2.5 m、3 m高导风屏障3种工况下列车的三分力系数的影响,如表1所示。相同工况下,桥上无车、列车在线路上游时导风屏障对桥梁三分力系数的影响,如表2所示。

表1 导风屏障对列车三分力系数的影响表

工况	C_D	C_L	C_{MX}
无风屏障	1.72	0.123 6	0.172 1
2.5 m导风屏障	0.184 2	0.782 6	0.025 6
3 m导风屏障	0.167 6	0.345 1	0.022

表2 导风屏障对桥梁三分力系数的影响表

工况	C_D	C_L	C_{MX}
无车	0.667 7	0.318 3	0.009 5
2.5 m导风屏障	2.278 7	0.039 6	0.026 8
3 m导风屏障	2.220 7	0.173 7	0.183 8
单车上游	1.927 9	0.723 5	0.222 6
2.5 m导风屏障	2.242 1	0.419 3	0.059 4
3 m导风屏障	2.582 6	0.526 6	0.057 4

由表1和表2可知:

(1)列车和桥梁作为组合体共同存在时会改变桥面绕流特性,使其与桥梁作为单体存在时的三分力系数有明显差异。

(2)桥面设置导风屏障后,由于导风屏障的挡、导风效应,列车的侧力系数和倾覆力矩系数大幅衰减;由于梁体迎风面积的大大增加致使桥梁的侧力系数明显增大,倾覆力矩系数也有所增大。

2.3.2 桥梁内外风速的变化

采用风速折减系数^[7] R 表示导风屏障对桥梁内风速的衰减,具体指风屏障对近侧轨道中心线处,如图1所示,从轨底到列车高度范围内风速减小的比例,计算方法如式(4)所示。

风速折减系数为:

$$R = 1 - V_t/V_0 \tag{4}$$

式中: V_0 ——环境风速;

V_t ——近侧轨道中心线处,从轨底到列车高度范围内风速的最小值。

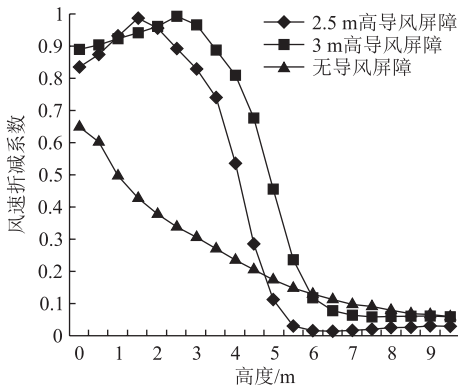


图1 导风屏障对风速折减系数的影响图

由图1可知:

(1)在0~4 m高度范围内,设置导风屏障时,风速折减系数显著大于未设置导风屏障时的风速折减系数;导风屏障越高,靠近列车顶部的风速折减系数越大。

(2)导风屏障的安装对桥梁内部的风速影响显著,可大幅减小列车周围的风速,衰减风荷载对列车的影响,有利于行车安全。另外,导风屏障越高,导风屏障对大风的遮挡作用越明显,列车顶部(列车高度约3.8 m)附近的风速折减系数越小。

3 风-车-桥动力特性计算与分析

3.1 风-车-桥耦合振动分析模型及内容

模型中列车选用CRH3型客车,4×(1×动+2×拖+1×动)共16辆车,按德国低干扰谱模拟轨道不

平顺通过桥梁时的风-车-桥系统空间耦合振动动力响应进行仿真计算与分析,风-车-桥耦合振动分析方法及系统运动方程的求解详见参考文献[8-10]。

采用未设置导风屏障与设置2.5 m、3 m高导风屏障3种工况下的风-车-桥耦合振动分析,研究导风屏障高度、风速对列车动力性能的影响,从而确定该桥导风屏障高度与横风作用下列车安全行车阈值的关系。

桥面风速为0~30 m/s,列车运行速度350 km/h。

3.2 桥上车体的动力响应

依据GB/T 5599-2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》^[11],列车的动力学性能主要包括列车运行的稳定性(稳定性即安全性,包括脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力等)、运行品质(采用车体振动加速度进行评价)、运行平稳性(采用平稳性指标或乘坐舒适度进行评价)。

未设置导风屏障、设置2.5 m、3 m高导风屏障时,迎风侧动车、拖车的脱轨系数、轮重减载率随风速的变化曲线如图2、图3所示,迎风侧桥上列车及桥梁响应均比背风侧大,故本文仅列举迎风侧结果。

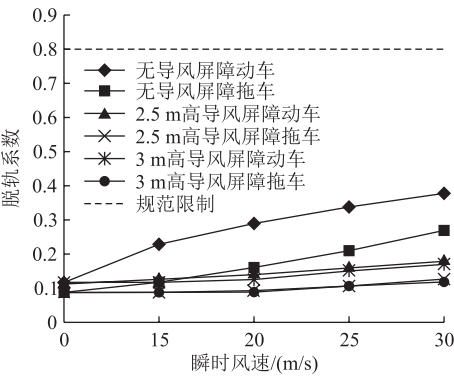


图2 列车脱轨系数随风速的变化图

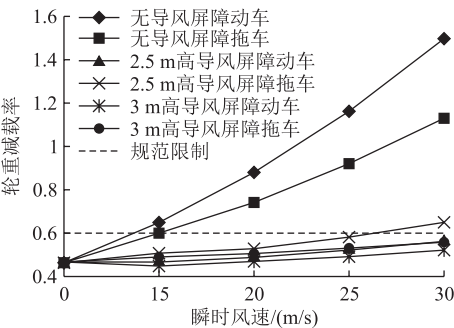


图3 列车轮重减载率随风速的变化图

未设置导风屏障、设置2.5 m、3 m导风屏障时,迎风侧动车、拖车的横、竖向振动加速度如图4、图5所示。

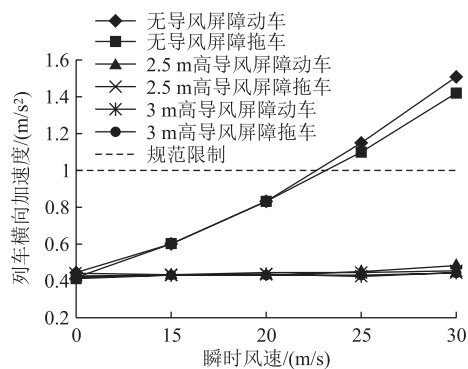


图4 列车横向加速度随风速的变化图

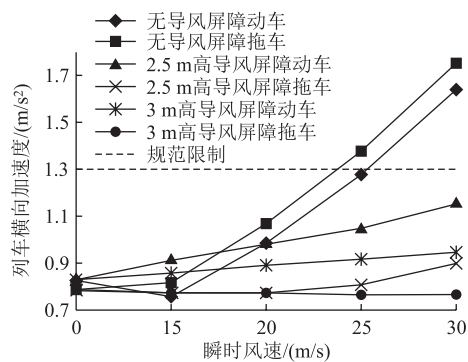


图5 列车竖向加速度随风速的变化图

从列车的脱轨系数、轮重减载率、横(竖)向加速度对风速变化曲线可以看出:

(1) 无风或风速 $\leq 20\text{ m/s}$ 时,列车的响应值均较小;随着风速的增大,响应值增大,且风速越大,趋势越显著。由此可见,风速较高($\geq 20\text{ m/s}$)时,风速是影响行车安全性和运行品质的主要因素。

(2) 未设置导风屏障时,列车脱轨系数、轮重减载率均随风速的增大而增加;风速 $\leq 30\text{ m/s}$ 时,列车脱轨系数小于限值 0.8 ;风速达到 15 m/s 时,轮重减载率为 0.88 ,即超出限值 0.6 ,表明此时列车在桥上需要限速。设置导风屏障后,列车脱轨系数、轮重减载率随风速的增加趋势变得平缓, 2.5 m 高导风屏障时,限速值可提高到 25 m/s ;设置 3 m 高导风屏障时,限速值可提高到 30 m/s 。

(3) 未设置导风屏障时,风速为 25 m/s 时,列车最大横向加速度达到 1.15 m/s^2 ,已超出对应限值 1.0 m/s^2 ,列车最大竖向加速度达到 1.38 m/s^2 ,超出限值^[12] 1.3 m/s^2 。设置导风屏障后,列车最大横向加速度、最大竖向加速度均大幅减小,且最大横向加速度不随风速的变化而变化;即使风速达到 30 m/s ,设置2种高度的导风屏障,列车最大横、竖向加速度均

在限值内。
(4) 不设置导风屏障,风速达到 30 m/s 时,轮轴横向力仍在限值内;以车体振动加速度评价的列车运行品质、平稳性,以及舒适度均满足GB/T 5599-2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》规定要求,设置导风屏障后各指标均有提升。

3.3 桥梁的动力响应

未设置导风屏障、设置 2.5 m 、 3 m 高导风屏障时,桥梁的最大横向、竖向位移如表3所示。

表3 不同风速下桥梁响应最大值表

桥梁响应	风屏障类型	平均风速/(m/s)				
		0	15	20	25	30
桥梁横向最大位移	无风屏障	1.46	3.44	8.72	11.26	16.48
	2.5 m导风屏障	1.46	1.35	1.24	1.08	1.0
	3 m导风屏障	1.46	1.35	1.23	1.07	0.88
桥梁竖向最大位移	无风屏障	8.9	8.8	8.72	8.6	8.46
	2.5 m导风屏障	8.9	8.79	8.7	8.58	8.44
	3 m导风屏障	8.9	8.84	8.79	8.74	8.67

由表3可知:
(1) 桥梁未设置导风屏障时,其横向最大位移从风速为 0 m/s 时的 1.46 mm 增加到 30 m/s 时的 16.48 mm ,竖向最大位移从风速为 0 m/s 时的 8.9 mm 减小到 30 m/s 时的 8.46 mm ,这是由于横桥向是风的主流方向,风对桥梁横向位移的影响比竖向位移显著。

(2) 设置导风屏障后,桥梁的横向最大位移减小到 1.46 mm ,且随风速的增大而减小,风速达到 30 m/s 时,横向最大位移仅为 1 mm ;桥梁的竖向最大位移同样随风速的增大而减小。这表明,导风屏障的设置并未增加桥梁的动力响应,反而因其合理的挡、导风结构减小了大风对桥梁的影响。

3.4 横风作用下列车运行安全域分析

要满足列车行车安全性、运行品质的要求,列车运行时的各项动力响应值均须在评价指标限值内。

根据以上分析,该桥梁为设置导风屏障,风速达到 15 m/s 时,轮重减载率即超出限值,列车须限速通行;设置 2.5 m 高的导风屏障,风速达到 25 m/s 时,列车各项测试值均在其限值内,风速达到 30 m/s 时,列车轮重减载率超出限值、竖向加速度临近限值;因此,设置 2.5 m 高的导风屏障时,列车仅能在风速 $\leq 25\text{ m/s}$ 的情况下安全通行。设置 3 m 高的导风屏障,风速达到 30 m/s 时,各项响应值均在其限值内,列车无需限速,可以满足列车按设计速度 350 km/h 安全通过桥梁的要求。

4 结论

结合有无导风屏障时风洞试验和不同风速时风-车-桥系统的动力响应分析结果,得到主要结论如下:

(1) 导风屏障的安装对桥梁内部的风速影响显著,可大幅减小列车周围的风速,衰减风荷载对列车的影响,有利于安全行车。

(2) 导风屏障的设置并未增加桥梁的动力响应,反而因其合理的挡、导风结构减小了大风对桥梁的影响。

(3) 桥梁未设置防风措施,风速达到 15 m/s 时,列车须限速通行;设置高度 3 m 的导风屏障后,风速达到 30 m/s,列车仍可按设计速度 350 km/h 安全通过。

参考文献:

- [1] TG/01-2014 铁路技术管理规程(高速铁路部分)[S].
TG/01-2014 Railway Technical Management Regulations (High-speed Railway Section) [S].
- [2] 刘庆宽,杜彦良,乔富贵. 日本列车横风和强风对策研究[J]. 铁道学报, 2008, 30(1): 82-88.
LIU Qingkuan, DU Yanliang, QIAO Fugui. Train-crosswind and Strong Wind Countermeasure Research in Japan [J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(1): 82-88.
- [3] 黄双林. 兰新高铁防风标准研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(6): 14-17, 73.
HUANG Shuanglin. Research on the Wind Break Standard of Lanzhou-Urumqi High-speed Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(6): 14-17, 73.
- [4] 张田. 强风场中高速铁路桥梁列车运行安全分析及防风措施研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
ZHANG Tian. Study on Running Safety of Trains and Windproof Measures for High-speed Railway Bridges in Strong Wind Field [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [5] 郭薇薇,夏禾,张田. 桥梁风屏障的气动效应及其对高速列车运行安全的影响分析[J]. 工程力学, 2015, 32(8): 112-119, 128.
GUO Weiwei, XIA He, ZHANG Tian. Analysis on Aerodynamic Effects of Bridge Wind Barrier and Its Influence on Running Safety of a High-speed Train [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(8): 112-119, 128.
- [6] JTG/T 3360-01-2018 公路桥梁抗风设计规范[S].
JTG/T 3360-01-2018 Wind-resistant Design Specification for Highway Bridges [S].
- [7] 吕娜,刘伟,谢海清,等. 叶片式导风屏障挡风性能优化研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(1): 78-82, 88.
LV Na, LIU Wei, XIE Haiqing, et al. Study on Optimization of Wind-proof Performance of Vane-type Wind Deflector [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(1): 78-82, 88.
- [8] 张楠,夏禾,郭薇薇,等. 京沪高速铁路南京大胜关长江大桥风-车-桥耦合振动分析[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 41-48.
ZHANG Nan, XIA He, GUO Weiwei, et al. Analysis on the Wind-Vehicle-Bridge Coupling Vibration for Nanjing Dashengguan Yangtze River Bridge of Beijing-Shanghai High-speed Railway [J]. China Railway Science, 2009, 30(1): 41-48.
- [9] 李永乐,董世斌,臧瑜,等. 大跨度公轨两用悬索桥风-车-桥耦合振动及抗风行车准则研究[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 114-120.
LI Yongle, DONG Shifu, ZANG Yu, et al. Coupling Vibration of Wind-vehicle-bridge System for Long-span Road-rail Suspension Bridge and Resistant-wind Criterion of Running Train [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(12): 114-120.
- [10] 中国铁道科学研究院. 动车组大风科学实验报告[R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2015.
China Academy of Railway Sciences Corporation Limited. Scientific Experiment Report on EMU Gales [R]. Beijing: China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, 2015.
- [11] GB/T 5599-2019 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范[S].
GB/T 5599-2019 Specification for Dynamic Performance Assessment and Testing Verification of Rolling Stock [S].
- [12] 许自强,何德华,于卫东. 大风工况动车组运行速度限值研究[J]. 铁道机车车辆, 2016, 36(1): 39-43.
XU Ziqiang, HE Dehua, YU Weidong. Research on Limit Operational Speed of CRH Train under High-speed Wind Condition [J]. Railway Locomotive & Car, 2016, 36(1): 39-43.